

海面高度計データを同化した黒潮変動予測実験

淡路敏之、小守信正、石川洋一

(京都大学大学院理学研究科地球物理学教室)

Assimilation Experiments of the Kuroshio Variabilities using TOPEX/Poseidon Altimetric Data

TOSHIYUKI AWAJI, NOBUMASA KOMORI, AND YOICHI ISHIKAWA

Department of Geophysics, Graduate School of Science, Kyoto Univ., Kyoto 606-8502

Abstract: As a first step towards constructing a regional ocean state estimation for the Kuroshio around Japan, we have studied the capability of short-range forecasting of the Kuroshio variability by assimilating TOPEX/Poseidon altimetric data into a regional 1 1/2-layer primitive equation model with a variational initialization scheme. Using the sea surface dynamic height data derived from TOPEX/Poseidon altimetry, we carried out prediction experiments of Kuroshio path variations from 1993 to 1994. Although we used a mean data from a 3-year simulation as the background field for initialization in our experiments, the Kuroshio path variation was nevertheless successfully reproduced for up to two months after the initialization. In particular, the eastward progression speed and the amplitude of the Kuroshio meander were quite similar to those observed. These results show a dramatic improvement in accuracy in both initialized velocity and vorticity fields and hence confirm the efficiency of our variational assimilation method for the initialization of short-range numerical forecasting of the Kuroshio path variations.

1 はじめに

十年ないし数十年スケールの気候変動を予測し、そのメカニズムを明らかにするためには、海洋における熱や物質の輸送混合過程を理解することが不可欠である。特に北太平洋においては、北大西洋とは大きく異なり、南北方向の熱輸送量の約半分にあたる 0.4 PW (1 PW = 10^{15} W) を水深 800 m 以浅の表層循環が担っている (Bryden *et al.*, 1991) ことや、黒潮統流域での表層の熱バランスに移流の効果が重要であることから、北太平洋域の十年スケールの気候変動のメカニズムとして提唱されている沈み込み振動 Subduction Oscillation などの現象を考える場合、沈み込む水塊の特性に、日本周辺での一ヶ月から数ヶ月程度の黒潮変動が、特に晩秋から冬季の海面冷却効果と相まって影響を与えている可能性が推測される。従って、時空間的に十分な分解能で、黒潮の流速場と熱輸送量を定量的に把握し、大気・海洋間および亜熱帯循環・亜寒帯循環間の熱交換を考慮に入れた日本周辺の黒潮域における熱輸送バランスを明らかにすることは、気候変動の解明にとって極めて重要である。

日本周辺における黒潮変動の代表的な例としては、その流路の経年変動がよく知られている。これまでの観測結果から、それは比較的安定な三つの流路、すなわち非大蛇行接岸流路 (以下では直進路と

呼ぶ)・非大蛇行離岸流路 (C型流路)・大蛇行流路に分類され (Kawabe, 1985; Fig.1)、それらの形成機構に関しては、主に流速・流量の大小という観点から研究がなされてきた (Akitomo *et al.*, 1991) が、流路間の遷移機構や短周期変動過程についての理解は未だ不十分である。その原因の一つとして、力学的に解析が可能な客観解析データが存在しないことが挙げられる。流速の直接観測は ASUKA (Affiliated Surveys of the Kuroshio off Cape Ashizuri: 足摺岬沖黒潮協同観測) などの限られた測線で行われておらず、多くは水温と塩分の観測値から無流面を仮定して求めた地衡流速や、潮位差の変動から推定した相対的な流速変動である。最近では、流路の遷移に短期的な流量変動が重要であるとの指摘が観測・理論の両面からなされており、これらの研究を更に発展させる上でも、渦度場の時間発展が記述可能な分解能で流速場・温度場を再現することは有益であると考えられる。これは、Awaji *et al.* (1991) などの研究を踏まえると、日本周辺での黒潮流路の短周期変動 (約 1 ヶ月程度) の解析についても同様である。

そこで本研究では、現実的な海岸線を持つ高分解能の 1.5 層有効重力モデルに Ishikawa *et al.* (1999; 以下 IAK99 と略記) の同化スキームを適用し、海面高度計データの同化実験を行なう。黒潮の数日から数週間程度の時間スケールの現象を予測する場合、

傾圧不安定の効果は本質的に重要であり、また瞬時に isostasy が成り立つという 1.5 層モデルの仮定は厳密には適切でない。また、海底地形効果の重要性を指摘する研究結果 (Masuda *et al.*, 1999) もある。これらを考慮すると、より現実的な黒潮変動の再現を目指すには、少なくとも 2 層モデルの使用が望ましい。しかしながら、海面高度計や海面水温などの人工衛星リモートセンシングデータという海面付近の情報を用いて海洋の内部構造をいかに推定するかという問題に関しては、理論的に解決しなければならない課題も多く、今後の研究成果を待たねばならない。一方、1.5 層有効重力モデルは、境界面の変動が海面の変動と一対一に対応しており、このような問題を考慮する必要はない。また 1.5 層モデルであっても、傾圧不安定に伴う渦の発生そのものは再現できないものの、発生した傾圧渦のその後の時間発展及びそれも含めた表層流の非線形発展はかなり高い精度で追跡できるという指摘もある (Hurlburt, 1986)。従って、発生した傾圧渦をデータ同化によって取り込めれば、モデルの不十分性を緩和できる可能性がある。そこで、TOPEX/Poseidon 海面高度計の格子化データ (Kuragano and Shibata, 1997; 以下 KS97 と略記) を同化する初期値化実験を行い、この同化システムによる現実の黒潮短期変動予測の可能性について検討する。なお以下で示す notation は原則として Ide *et al.* (1997) に従う。

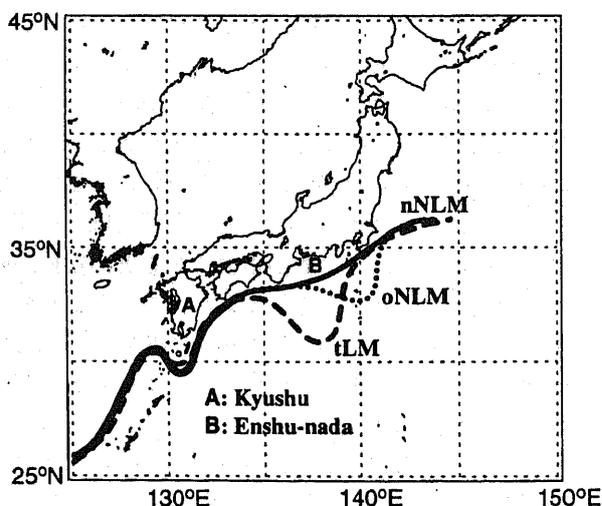


FIG. 1. Typical paths of the Kuroshio south of Japan. nNLM is the nearshore non-large-meander path; oNLM is the offshore non-large-meander path; tLM is the typical large-meander path.

2 同化モデル

2.1 観測データ

現場観測データと TOPEX/Poseidon 海面高度計データから最適内挿法を用いて時空間的に格子化された KS97 の絶対海面力学高度データを同化に用いた。空間分解能は緯度・経度ともに 1° であり、時間的には 1993 年 1 月 3 日を起点とする 5 日毎のデータとされている。本研究で用いた観測点 (854 点) の位置を Fig.2 に示す。実際の格子化データはさらに多く、モデル海洋では陸として扱っている領域にも存在するが、今回は陸岸に近い観測点は敢えて使用していない (理由は後述)。

2.2 数値モデル

より現実的に黒潮変動を再現するため、通常の 1.5 層予報方程式に境界面変位の水平拡散項 $K_H \nabla^2 h$ を加えた (式は省略)。これは連続成層モデルにおける密度の水平拡散項に対応するものである。これにより、 $L_v \sim (A_H/\beta)^{1/3}$ の Munk 層の他に $L_d \sim (K_H/\lambda_I^2)/\beta$ の拡散型西岸境界層のスケールが得られ、 $A_H \sim K_H$ ならば、内部変形半径 λ_I が Munk 層の幅より大きいときには粘性系の、小さいときは拡散系の西岸境界層となる。黒潮域では $L_v \sim 20$ [km], $\lambda_I \sim 35$ [km] である。外力としては、Hellerman and Rosenstein (1983) の月平均風応力場と、KS97 の 5 日毎の海面力学高度場から作成した開境界上での境界面変位を、それぞれ時間的に線形補間して用いた。予測実験は特徴的な黒潮変動が発生した 1993 年初頭から 1995 年末まで (後述) を対象とし、1993 年 1 月 3 日の格子化データから初期条件を作成して 1995 年 12 月 31 日まで積分を行った。その 3 年間の平均場を Fig.2 に示す。なお、黒潮の流動構造を十分に再現するために、モデルの格子間隔は $1/12^\circ$ と高分解能にした。

2.3 同化スキーム

IAK99 は、一連の双子実験によって、変動の激しい日本南岸における黒潮の初期値化問題に対する彼らの開発した Weak Constraint 法同化スキームの有効性を示した。しかしながら実際の観測データを用いて現実の海洋の変動予測を行う場合、誤差共分散行列などの同化パラメータの決定は、双子実験の場合と違って容易ではない。そのため、同化を行った場合でも潮位計との相関が負になるなど、未

だ成功を収めているとは言えない状況にある。そこで、同化実験に用いる KS97 データ及び上記のモデル実験結果から、観測及びモデル双方の誤差共分散行列を見積もり、それらを以下に示す同化スキームに使用した。

IAK99 の評価関数は次のような最適内挿法のパート J^S と力学的制約条件のパート J^D からなっている。

$$J[\mathbf{x}] = J^S[\mathbf{x}] + J^D[\mathbf{x}]. \quad (1)$$

モデルの平均場を \mathbf{x}^b 、観測値を \mathbf{y}^o とし、それらの誤差共分散行列をそれぞれ \mathbf{B} 及び \mathbf{R} とすると、 J^S は、

$$\begin{aligned} J^S[\mathbf{x}] &= \frac{1}{2} \|\mathbf{x} - \mathbf{x}^b\|_{\mathbf{B}^{-1}}^2 + \frac{1}{2} \|\mathbf{H}\mathbf{x} - \mathbf{y}^o\|_{\mathbf{R}^{-1}}^2 \\ &= \frac{1}{2} \|\mathbf{x} - \mathbf{x}^{OI}\|_{\mathbf{B}^{-1} + \mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H}}^2 + \text{Constant}, (2) \end{aligned}$$

ここで、 $\mathbf{x}^{OI} \equiv \mathbf{x}^b + \mathbf{B}\mathbf{H}^T(\mathbf{H}\mathbf{B}\mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1}(\mathbf{y}^o - \mathbf{H}\mathbf{x}^b)$ 。

次に、 J^D に関しては以下の条件を課すことによって、モデルの力学による推定値の修正を行う。

$$J^D[\mathbf{x}] = \frac{1}{2} \|\partial \mathbf{x} / \partial t\|_{\mathbf{W}}^2. \quad (3)$$

これは場の定常性を制約条件に課すことに相当するが、 J^D は評価関数 J の一部であり、厳密には $J^D=0$ とはならず (すなわち、weak constraint である)、従って、時間変動の大きい高周波ノイズを選択的に除去する力学的ローパスフィルターとして作用する特性を有している。(J^D のゆらぎの大きさは重み \mathbf{W} によって決定されると。) この特性を利用すると、初期値化後の予報値の主たる汚染源である高周波ノイズ (ミスフィットによって発生する重力波) を効果的に除去できることが IAK99 によって確かめられている。

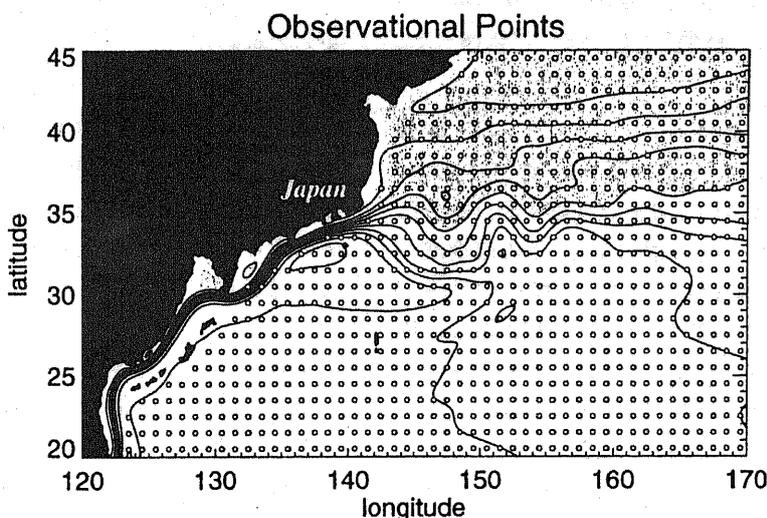


FIG. 2. Model geometry and observational points for the prediction experiments (white dots). Background contours represent the mean field of the three-year simulation (contour interval is 50 m and shaded region indicates upward displacement).

3 短期変動予測実験

海上保安庁発行の海洋速報によると、1993 年の 3 月中頃から発達しはじめた蛇行は、4 月の後半から数ヶ月間持続した後、振幅を変動させながら徐々に減衰した (Fig.3)。また翌年の 1994 年には、7 月頃に熊野灘から遠州灘にかけて小蛇行が存在していたが、すぐに減衰して直進路に戻った (Fig.5)。そこで、これらの各イベントに着目したデータ同化後の短期変動予測を行ったが、ここでは流路変動の代表例である下記のケースについて報告する。

Case 1: 小蛇行が大蛇行へ発達し始める直前の 1993

年 3 月 4 日 (Fig.3)。

Case 2: 小蛇行が発生し、その後減衰し始める 1993 年 7 月 2 日 (Fig.5)。

いずれのケースも、上述の 3 年間のシミュレーション結果から作成した平均場 $\bar{\mathbf{x}}$ を背景値 \mathbf{x}^b として初期値化を行い、その後 60 日間予報を行った。観測値の誤差共分散行列 \mathbf{R} については、平均場の誤差および格子化に伴う誤差を考慮し、海面変位の観測誤差の標準偏差は 7 cm として作成した。また、背景値の誤差共分散行列 \mathbf{B} に関してはモデルの 3 年間の変動の標準偏差で近似した。各ケースは全て

独立であり、初期値化の際に他のケースの予報結果は用いていない。また、初期値化後は一切データを同化していないこと強調しておく。

Case 1: 蛇行発達期間 (Fig.4) 初期にはほぼ直進路であったにもかかわらず、その後の蛇行の発達過程がよく再現されている。海洋速報による黒潮流路変動と比較すると、低気圧性循環の発達が少し弱いものの、蛇行のピークが二ヶ月間で約 400 km 東進し 31°N 付近まで達している点などは非常によく一致している。

Case 2: 蛇行減衰期間 (Fig.6) 7月に遠州灘沖で発生した小蛇行は、発生時期・振幅ともに海洋速報のそれと酷似している。しかしながらその後は減水せず、蛇行部が下流へと移動し、C型流路に遷移した。

以上の結果から、改良 1.5 層モデルと二次元変分法を用いることにより、一部問題が見られるものの、一ヶ月から二ヶ月程度の短期流路変動予測は十分に可能であることがわかる。特に Case 1 の直進路から蛇行路への遷移過程については、蛇行のピークの東進速度 (二ヶ月で約 400 km) や蛇行振幅は観測されたそれと非常によく一致した。流路の短期変動予測が成功した理由としては、いくつかの要因が推測される。まず、初期値化手法として用いた二次元変分法では、場を修正する際、波の伝播する方向や流れの向きに沿って非等方的に情報が伝達される (IAK99) ため、特に日本南岸の強流域で従来の手法に比べて非常に精度の高い初期値が得られているからである。また、蛇行の発達の初期段階で重要な傾圧不安定に伴う渦の生成は 1.5 層モデルでは予測できないが、観測データを同化することにより流軸の沖側にそのような渦が再現され、その後の蛇行の成長を予測できたことによる。事実、対照実験として、初期値化をせずに背景値から予報を行ったケースでは、蛇行は発生せず直進路が維持されるだけであった。一方 Case 2 においては、初期の蛇行の再現性は良いものの、蛇行が消滅して直進流路に復帰しない。Sekine(1990) や Masuda *et al.*(1999) は直進流路の維持に対する伊豆海嶺と陸棚スロープの重要性を指摘していることから、その主な原因は 1.5 層モデルでは再現できない海底地形効果のためだと考えられる。

4 まとめと議論

黒潮客観解析データの作成に向けた第一歩として、現実的な海岸線を持つ高分解能の 1.5 層有効重力 primitive 方程式モデルに海面高度計データを同化する初期値化実験を行い、黒潮短期変動予測の可能性について考察した。具体的には、Kuragano and Shibata (1997) により現場観測と TOPEX/Poseidon 海面高度計から最適内挿法を用いて格子化された絶対海面力学高度データを同化することにより、特に一ヶ月程度の流軸パターン変動の再現性に焦点を絞って、現実の黒潮短期変動予測の可能性を調べた。その結果、一ヶ月から二ヶ月程度の短期流路変動予測は概ね可能であることがわかった。特に直進路から蛇行路への遷移過程については、蛇行のピークの東進速度 (二ヶ月で約 400 km) や蛇行振幅は観測されたそれと非常によく一致し、また蛇行維持期においても、初期の蛇行の再現性は低かったにもかかわらず、その後の蛇行の予報結果は良好であった。

上述の初期値化を行った際に蛇行路の再現性が必ずしも良くない理由としては、次の三つが考えられる。まず第一に、絶対海面力学高度データのうち陸岸に近いものは使用していないため、蛇行が十分には分解できていないこと、第二に、初期値化を行う際の背景値 x^b としてシミュレーション結果から作成した平均値 \bar{x} を用いていること、第三に、背景誤差共分散行列 B の決定に変動自身の分散を利用していることである。

KS97 は海面力学高度の平均場を、TOPEX/Poseidon による観測と同時期の現場観測および気候値データから作成しているが、 $1^\circ \times 1^\circ$ の分解能では日本南岸の黒潮を再現するには不十分である。また変動成分に関しても、陸岸付近の浅海域での海面高度計データは潮汐補正の影響などもあって精度は高くないことが知られている。事実、陸岸付近のデータも用いた予備実験では、使用したデータの量は多いにもかかわらず初期値化誤差は大きくなるという結果になった。もちろん、これには観測誤差の共分散行列 R の与え方 (全観測点で誤差の標準偏差が同じ) の問題もあり、陸岸付近の観測データの精度を過大評価した結果、観測データに含まれる誤差が初期値化結果を悪化させたという側面も存在するが、蛇行発生に関する陸岸境界層の重要性 (Masuda *et al.*, 1999) を考えると、陸岸付近の浅海域での正確な海面高度計データの同化がこの問題の改善に極めて重要である。

第二・第三の理由は、本研究ではいわば表裏一体の関係にある。数値シミュレーションが現実の海洋変動を統計的には正確に再現している場合、背景値

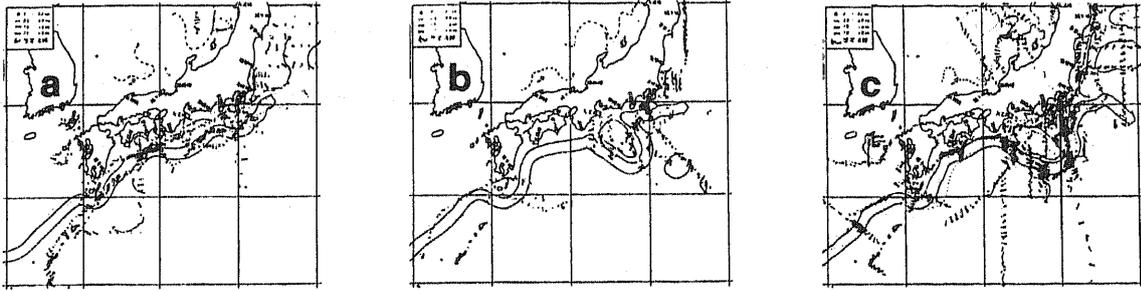


FIG. 3. Kuroshio path variation adopted from the Oceanographic Prompt Reports by the Japan Maritime Safety Agency. (a) March 3-17, 1993, (b) April 1-14, and (c) April 27-May 19.

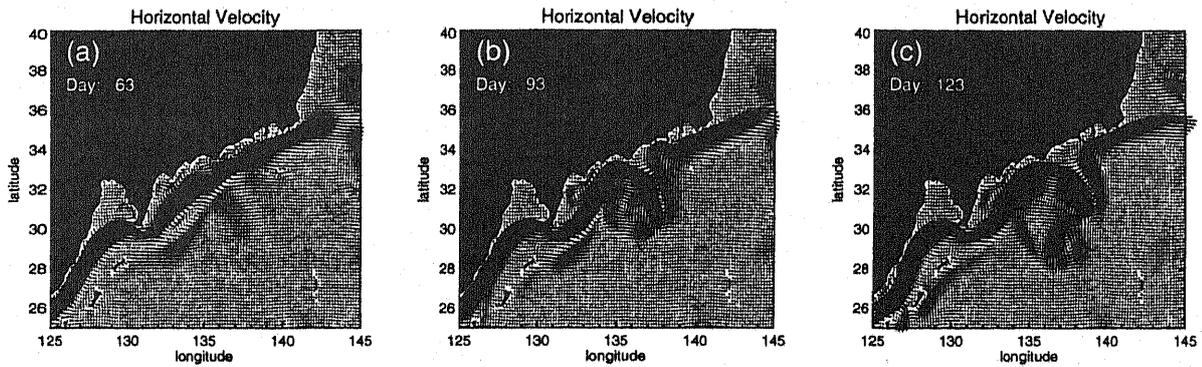


FIG. 4. Initialized and forecasted velocity fields of the case 1. (a) March 4, 1993, (b) April 3, and (c) May 3.

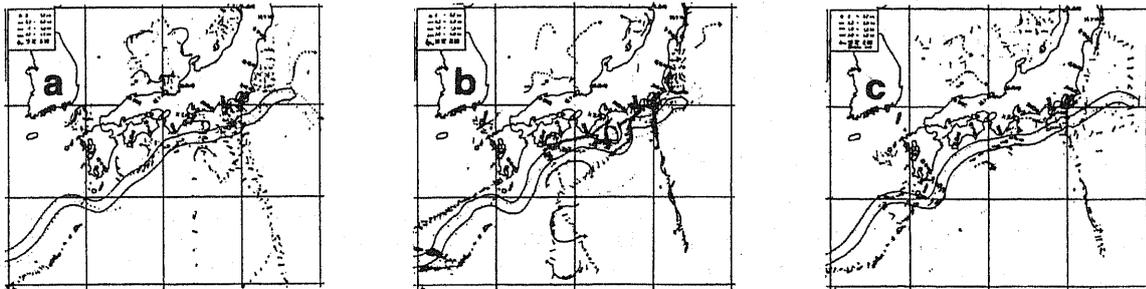


FIG. 5. As in Fig. 3 but for (a) June 1-14, 1994, (b) June 29-July 13, and (c) August 3-17.

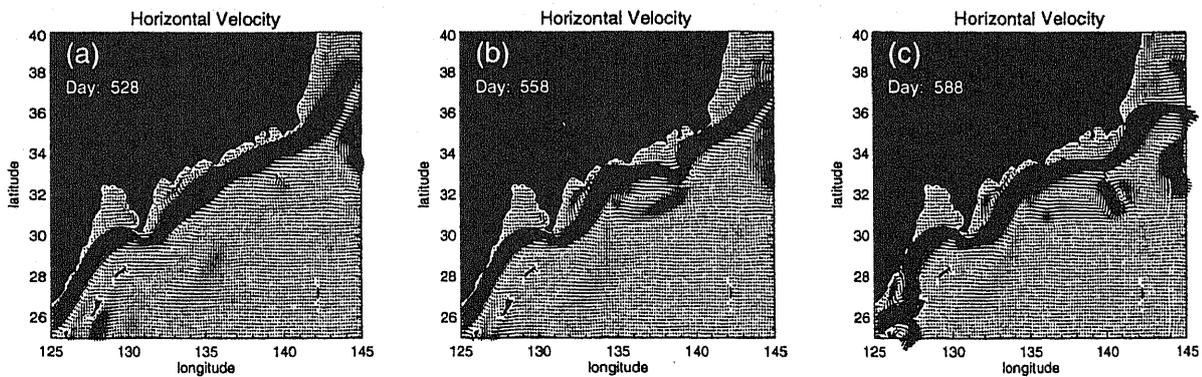


FIG. 6. As in Fig. 4 but for the case 2. (a) June 12, 1994, (b) July 12, and (c) August 11.

として平均値を用いると、背景誤差の共分散行列は変動の共分散行列に一致することになる。しかしながら今回用いたシステムでは、シミュレーション結果から計算される平均値は、観測データから推測される平均値とは大きく異なり、日本南岸では明瞭な直進路となってしまっているため、変動の共分散を用いて誤差の共分散を近似することはあまり適切ではない。また、シミュレーション結果の変動の標準偏差を格子化データのそれと比較すると、続流域で2倍以上の変動を示す一方で、観測データでは八丈島の西方に見られる変動の極大が存在しない。この情報を基に誤差共分散行列を決定しているため、最適内挿法による解析値は、続流域では観測値に、蛇行域では背景値に過度に依存する。二次元変分法による初期値化結果は、評価関数の最適化を行う際の第一推定値（最適内挿法による解析値）に依存する（IAK99）ため、背景誤差共分散を変動の共分散で近似し、かつ直進路をとっている平均値を背景値として用いる限り、流軸が蛇行している場合の初期値化精度は向上しないと考えられる。このことは、背景値としてCase 1の40日予報値を用いた場合に、蛇行部の再現性がかなり向上したこと（図省略）と合致している。

最後に、「初期値化プラス十日予報」という設定で双子実験を行い、最適内挿法と二次元変分法による結果の比較・検討を行った結果について一言触れておく。本研究の二次元変分法を初期値化スキームに適用することによって、従来の最適内挿法を用いた場合に発生する重力波ノイズを効果的に抑制することが可能となり、日本南岸での h のrms誤差は最適内挿法による結果と比較して約10%減少した。さらに、直接には同化されていない流速 $\mathbf{u}=(u, v)$ および高次の物理量である渦度 ζ に関しても、モデルの力学を媒介とすることにより、特に日本南岸の強流域において初期値化精度が大幅に向上し、rms誤

差はそれぞれ約35%、約50%減少した。この結果は、黒潮流路の変動予測に、高精度な渦度場の再現が本質的に重要である点を踏まえると、本研究の手法は、現実の黒潮変動の短期予報に対して極めて有益であることを示している。なお、本研究の数値実験は京都大学大型計算機センターのFACOM VP2600, VPP800にて行いました。記して感謝致します。

参考文献

- Akitomo, K., T. Awaji, and N. Imasato, 1991: Kuroshio path variation south of Japan 1. Barotropic inflow-outflow model. *J. Geophys. Res.*, **96**, 2549-2560.
- Awaji, T., K. Akitomo, and N. Imasato, 1991: Numerical study of shelf water motion driven by the Kuroshio: Barotropic model. *J. Phys. Oceanogr.*, **21**, 11-27.
- Bryden, H. L., D. H. Roemmich, and J. A. Church, 1991: Ocean heat transport across 24°N in the Pacific. *Deep-Sea Res.*, **38**, 297-324.
- Hellerman, S., and M. Rosenstein, 1983: Normal monthly wind stress over the world ocean with error estimates. *J. Phys. Oceanogr.*, **13**, 1093-1104.
- Hurlburt, H. E., 1986: Dynamic transfer of simulated altimeter data into subsurface information by a numerical ocean model. *J. Geophys. Res.*, **91**, 2372-2400.
- Ide, K., P. Courtier, M. Ghil, and A. C. Lorenc, 1997: Unified notation for data assimilation: Operational, sequential and variational. *J. Meteor. Soc. Japan*, **75**, 181-189.
- Ishikawa, Y., T. Awaji, and N. Komori, 1999: Dynamical initialization for numerical forecasting of ocean surface circulations using a variational assimilation system. *J. Phys. Oceanogr.*, accepted.
- Kawabe, M., 1985: Sea level variations at the Izu Islands and typical stablepath of the Kuroshio. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **41**, 307-326.
- Kuragano, T., and A. Shibata, 1997: Sea surface dynamic height of the Pacific Ocean derived from TOPEX/POSEIDON altimeter data: Calculation method and accuracy. *J. Oceanogr.*, **53**, 585-599.
- Masuda, S., K. Akitomo, and T. Awaji, 1999: Effects of stratification and bottom topography on the Kuroshio path variation south of Japan. Part I: Dependence of the path selection on velocity. *J. Phys. Oceanogr.*, **29**, 2419-2431.
- Sekine, Y., 1990: A numerical experiment on the path dynamics of the Kuroshio with reference to the formation of the large meander path south of Japan. *Deep-Sea Res.*, **37**, 359-380.